

## Теорія і практика радіовимірювань

УДК 681.586.5; 531.768

### КІЛЬКІСНА ОЦІНКА МЕТРОЛОГІЧНИХ МОЖЛИВОСТЕЙ ПРЕЦИЗІЙНОГО ЦИФРОВОГО АКСЕЛЕРОМЕТРА З ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИМ ДАВАЧЕМ.

Дубіковський А.О., Дем'яненко П.О.

*Дано оцінку метрологічних можливостей прецизійного акселерометра з волоконно-оптичним давачем.*

Переваги волоконно-оптичних трактів каналювання сигналів привертають увагу розробників давачів. Проаналізувавши метрологічні можливості аналогових волоконно-оптичних давачів (ВОД), ми прийшли до висновку про непридатність їх (як вимірювальних перетворювачів) для побудови прецизійних вимірювачів [1]. Причиною тому є принципово низькоточні вимірювання інтенсивності малопотужних оптичних сигналів в тракті ВОД. Аналіз можливих шляхів радикального підвищення точності вимірювань привів нас до висновку про необхідність відмови від аналогових і переходу до дискретних (імпульсних) принципів модуляції оптичного потоку в ВОД. Завдяки цьому, в ВОД можна формувати додаткові, *неоптичні*, параметри оптичного потоку і саме їх використовувати як реципієнтів інформації.

Результатом проведених робіт стала розробка на кафедрі КіВРА нового класу імпульсних ВОД (ІВОД) з часово-імпульсною модуляцією інтенсивності оптичного потоку [2]. Робота таких ІВОД дозволяє використовувати принцип «вимірювання - обрахунок», за якого величина систематичної абсолютної похибки вимірювань визначатиметься дискретною підрахунком, а відносна похибка залежатиме від величини вимірюваного прискорення. Мікропроцесорне опрацювання сигналу дозволить звести до мінімуму можливість привнесення похибки.

Приклад оптичної схеми ІВОД прискорення наведений на рис.1. Пружний підвіс конічного маятника виконаний як консольно закріплений кінець волоконного світловода (ВС), на якому закріплена інерційна маса (ІМ). У робочому режимі кінець маятника здійснює незгасаючий обертальний рух. За відсутності дії на акселерометр прискорення обертання маятника відбувається симетрично осі чутливості  $OZ$ . Оптичний сигнал ІВОД формується відбиванням оптичного потоку від циліндричних дзеркал, що перетинаються

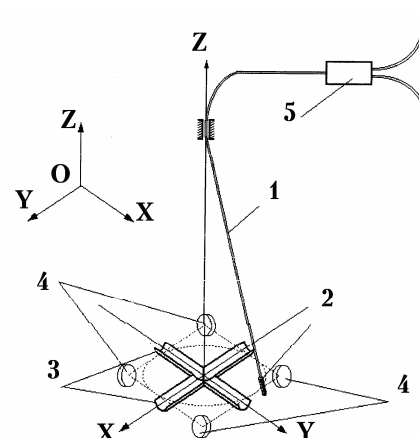


Рис. 1. Схема ВОД

- 1 - волоконний світловод;
- 2 - інерційна маса;
- 3 - дзеркальні поверхні;
- 4 - електромагніти;
- 5 - волоконно-оптичний розгалужувач-суматор

під прямим кутом і задають осі чутливості вимірювача  $OX$  і  $OY$ . Вихідний сигнал ІВОД є послідовністю оптичних імпульсів сформованих відгуками від відповідних дзеркал рис. 2.

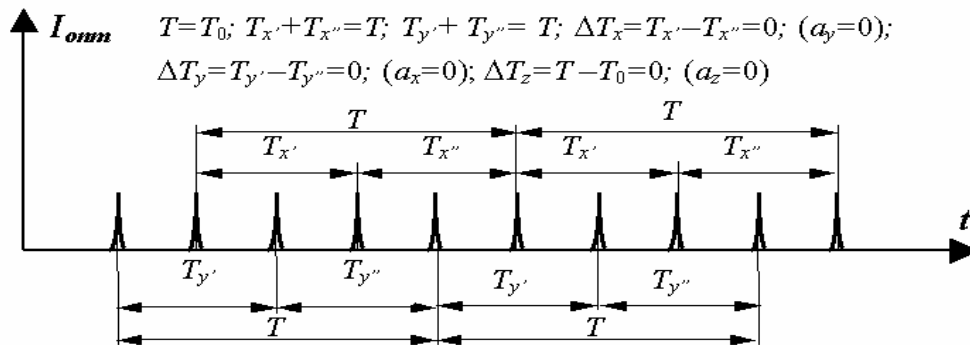


Рис.2. Вихідний сигнал ІВОД

$T$ -період обігу маятника;

$T_{x'}$ ,  $T_{y'}$  – час перебування маятника з одного боку осей  $OX$  і  $OY$ ;

$T_{x''}$ ,  $T_{y''}$  – часи перебування маятника з другого боку осей  $OX$  і  $OY$

Симетричні імпульси зображені на рис.2 відповідають випадку відсутності дії на ІВОД прискорення( $a=0$ ). При дії на ІВОД прискорення симетрія імпульсів буде порушена. Різниця часів перебування маятника з обох боків осей прийнята в якості міри величини бічного прискорення, що діє на ІВОД. При дії на ІВОД прискорення вздовж осі  $OZ$  симетрія імпульсів не порушиться, але зміниться їх період слідування і саме ця зміна приймається за міру прискорення [3].

Запорукою високої точності вимірювань за допомогою такого ІВОД є висока добротність кварцової коливальної системи та можливість високоточних вимірювань часових інтервалів.

Проведемо кількісну оцінку метрологічних можливостей розробленого вимірювача лінійних прискорень на основі такого ІВОД.

Для спрощення розрахунків приймемо наступні припущення:

- обертальний рух маятника незгасаючий;
- вектор сили пружності на кінці маятника лежить в площині  $XOY$ ;
- маса консолі ВС нехтовно мала;
- ІМ є матеріальною точкою.

Прийняті припущення дозволяють розглядати рух кінця консолі ВС із закріпленою на ньому ІМ, як рух матеріальної точки:

$$m\ddot{\mathbf{r}} = \mathbf{F}, \quad (1)$$

де  $m$  - величина ІМ;  $\mathbf{r}$ - радіус-вектор руху ІМ;  $\mathbf{F}$  - сила пружності консолі ВС.

Згідно [4],  $F = -AR_0$ , де  $A = \frac{3EI}{L^3}$  – жорсткість консолі ВС;  $E$  - модуль

Юнга для матеріалу ВС;  $I = \frac{\pi d^4}{64}$  - момент інерції поперечного перетину

BC;  $d$  - діаметр BC;  $L$  - довжина BC;  $R_0$  - радіус обертання ІМ. В проекціях на осі координат вираз (1) набуде вигляду:

$$m\ddot{x} = -Ax; \quad m\ddot{y} = -Ay \quad \text{або} \quad \ddot{x} + \omega^2 x = 0; \quad \ddot{y} + \omega^2 y = 0, \quad (2)$$

де  $\omega^2 = \frac{A}{m}$  - власна кутова частота обертання маятника. розв'язок (2) в загальному випадку має вигляд:

$$x = C_1 \cos \omega t + C_2 \sin \omega t; \quad y = C_3 \cos \omega t + C_4 \sin \omega t \quad (3)$$

Задавши початкові умови: ( $x(0) = 0$ ;  $y(0) = R$ ;  $\dot{x}(0) = V_0$ ;  $\dot{y}(0) = 0$ ), визначимо постійні інтегрування:  $C_1 = 0$ ;  $C_2 = \frac{-V_0}{\omega}$ ;  $C_3 = R_0$ ;  $C_4 = 0$ ; тут:

$V_0 = \left( \frac{2W_k}{m} \right)^{\frac{1}{2}}$  - лінійна швидкість руху ІМ;  $W_k$  - кінетична енергія ІМ.

З урахуванням початкових умов, система (3) набуде вигляду:

$$x = \frac{V_0}{\omega} \sin \omega t; \quad y = R_0 \cos \omega t \quad (4)$$

Система (4) - це параметричне (параметром є час,  $t$ ) представлення траєкторії руху ІМ. Виключаючи параметр  $t$ , отримаємо:

$$\frac{x^2}{\left( \frac{V_0}{\omega} \right)^2} + \frac{y^2}{R_0^2} = 1, \quad (5)$$

тобто, рівняння еліпса. В усталеному режимі (за умови ідентичності силової дії на ІМ з боку всіх електромагнітів) рух ІМ буде рівномірним рухом по колу, радіус якого може бути визначений з (5):

$$R_0 = \frac{V_0}{\omega} = V_0 \sqrt{\frac{mL^3}{3EI}}, \quad (6)$$

Період обертання маятника визначається виразом:

$$T_0 = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi \sqrt{\frac{mL^3}{3EI}}. \quad (7)$$

Розглянемо реакцію ВОД при дії на нього постійного за величиною і напрямку прискорення, вектор якого в одному випадку паралельний осі  $Ox$ , а в іншому - осі  $Oz$ . У першому випадку дія на ВОД порогової величини прискорення ( $a_{\text{пор}}$ )<sub>x</sub> приводить до зсуву центру описуваного кінцем маятника кола від початкового положення на деяку величину  $\Delta x_{\text{пор}}$ , при якій сила пружності консолі зрівноважить інерційну силу:

$$m(a_{\text{пор}})_x = -A\Delta x_{\text{пор}}. \quad (8)$$

Виходячи з того, що при впливі на ВОД порогової величини прискорення  $\Delta x_{\text{пор}} \ll R_0$ , з (4), беручи до уваги (6), представимо зв'язок  $\Delta x_{\text{пор}}$  з  $\Delta t_{\text{пор}}$ :

$$\Delta t_{\text{пор}} \approx \frac{T_0}{2\pi} \cdot \frac{\Delta x_{\text{пор}}}{R_0} \quad (9)$$

Умову реєстрації  $(a_{\text{пор}})_x$  можна подати як  $\Delta T_{\text{пор}} = 4\Delta t_{\text{пор}} = \frac{1}{f_{\text{ген}}}$ ; де  $\Delta T_{\text{пор}}$  - різниця тривалості двох сусідніх часових інтервалів (рис. 2 б), що обумовлена зсувом положення рівноваги маятника під дією  $(a_{\text{пор}})_x$  на величину  $\Delta x_{\text{пор}}$ ;  $f_{\text{ген}}$  - частота стабілізованого генератора високої частоти.

З виразів (7)-(9) визначимо порогову чутливість акселерометра вздовж осі чутливості "X":

$$(a_{\text{пор}})_x = \frac{R_0}{4f_{\text{ГВЧ}}} \cdot \left( \frac{3EI}{mL^3} \right)^{\frac{3}{2}}. \quad (10)$$

Максимальна величина прискорення, яка може бути виміряна акселерометром уздовж осі "X", визначиться, очевидно, співвідношенням:

$$(a_{\text{max}})_x = \frac{3EI}{mL^3} \cdot R_0. \quad (11)$$

Динамічний діапазон вимірюваних прискорень:

$$N_x = \frac{(a_{\text{max}})_x}{(a_{\text{пор}})_x} = 4f_{\text{ген}} \sqrt{\frac{mL^3}{3EI}}. \quad (12)$$

Швидкодія акселерометра визначається періодом обертання маятника (7). Якщо вектор прискорення паралельний площині XOY, і при цьому орієнтований довільно відносно осей "X" і "Y", то ненульовий результат буде отриманий в двох каналах ("X" і "Y") і повна величина вектора прискорення і його напрям визначиться як геометрична (векторна) сума отриманих величин його проекцій.

Другий випадок (вектор прискорення паралельний осі OZ) принципово відрізняється від розглянутого вище, оскільки інформаційним параметром тут виступає сама тривалість періоду обертання маятника, що вимірюється в третьому, "Z"-каналі, акселерометра. Вираз для періоду обертання маятника в цьому випадку матиме вигляд:

$$T = 2\pi \left( \frac{3EI}{mL^3} \pm \frac{a}{L} \right)^{-\frac{1}{2}}, \quad (13)$$

Знак "-" усередині дужок відповідає випадку збігу вектора прискорення з

позитивним напрямом осі 0Z. Користуючись (13), умову реєстрації порогового прискорення вздовж осі "Z" можна записати у вигляді:

$$\frac{1}{f_{\text{ген}}} = 2\pi \left[ \left( \frac{3EI}{mL^3} \right)^{-\frac{1}{2}} - \left( \frac{3EI}{mL^3} \pm \frac{(a_{\text{пор}})_z}{L} \right)^{-\frac{1}{2}} \right]. \quad (14)$$

Перетворюючи (14) з використанням формул наближеного обчислення отримаємо:

$$(a_{\text{пор}})_z \approx \frac{L}{\pi \cdot f_{\text{ген}}} \left( \frac{3EI}{mL^3} \right)^{\frac{3}{2}}. \quad (15)$$

При визначенні максимальної величини прискорення  $(a_{\text{max}})_z$ , яке може бути виміряне вздовж осі "Z", стикаємося з певними труднощами зважаючи на відсутність чітких фізичних обмежень на її величину або на можливість її визначення. Не залишаючи питання зовсім відкритим, в якості  $(a_{\text{max}})_z$  приймемо таку її величину, за якої період обертання маятника зміниться вдвічі (це умова, очевидно, не жорстка). З цієї умови:

$$(a_{\text{max}})_z \approx 9 \frac{EI}{mL^2}. \quad (16)$$

Відповідно, динамічний діапазон:

$$N_z = \frac{(a_{\text{max}})_z}{(a_{\text{min}})_z} = \pi f_{\text{ген}} \sqrt{\frac{3mL^3}{EI}}. \quad (17)$$

Як видно з виразів, отриманих в процесі аналізу, основні метрологічні параметри акселерометра можна легко змінювати в широких межах шляхом вибору конструктивних параметрів ВОД і частоти генератора підрахункових імпульсів.

Так, використовуючи для підвісу маятника стандартний ВС типу "кварц-кварц" із зовнішнім діаметром (по кварцу) 125 мкм ( $E=7 \cdot 10^{10}$  Н/м<sup>2</sup>;  $I=1,2 \cdot 10^{-17}$  м<sup>4</sup>) і прийнявши  $L=1$  см,  $m=0,1$  г,  $R_0=2$  мм и  $f_{\text{ген}}=5 \cdot 10^7$  Гц, із виразів (7), (10)-(12), (15)-(17), отримаємо:

$$(a_{\text{пор}})_x=4 \cdot 10^{-5} \text{ м/с}^2; (a_{\text{max}})_x=50 \text{ м/с}^2; N_x=1,2 \cdot 10^6;$$

$$(a_{\text{пор}})_z=2 \cdot 10^{-4} \text{ м/с}^2; (a_{\text{max}})_z=7,5 \cdot 10^2 \text{ м/с}^2; N_z=3,5 \cdot 10^6; T_0=4 \cdot 10^{-2} \text{ с.}$$

А поклавши  $L=10$  см та  $m=10$  г (при інших незмінних значеннях):

$$(a_{\text{пор}})_x=1,2 \cdot 10^{-12} \text{ м/с}^2; (a_{\text{max}})_x=5 \cdot 10^{-4} \text{ м/с}^2; N_x=4 \cdot 10^8;$$

$$(a_{\text{пор}})_z=8 \cdot 10^{-11} \text{ м/с}^2; (a_{\text{max}})_z=7,5 \cdot 10^{-2} \text{ м/с}^2; N_z=9 \cdot 10^8; T_0=12,5 \text{ с.}$$

Як видно з розрахунків, розроблений акселерометр має унікальні технічні параметри. Такий акселерометр, будучи встановленим, наприклад, на борту космічних апаратів (КА), дозволить визначати гальмівну дію на них решток атмосфер планет (для орбітальних КА), "вітрильний ефект" тиску "сонячного вітру" (для міжпланетних КА), а також здійснювати контро-

льовану корекцію параметрів орбіт (траєкторій) КА при вмиканні їх малопотужних бортових двигунів. Він може знайти застосування також при геофізичних дослідженнях та геологічних розвідках - скрізь, де необхідно вимірювати малі відхилення величини напруженості гравітаційного поля.

#### Література

1. Демьяненко П.А. Точность измерений посредством волоконно-оптических датчиков (проблемы и пути их решения). // Оптоэлектроника и полупроводниковая техника, 1995, вып. 29, с.88-93;.
2. Демьяненко П.А., Зиньковский Ю.Ф., Прокофьев М.И. Прецизионный цифровой акселерометр с волоконно-оптическим датчиком. // Радиоэлектроника. - 1997. - Т.40. - №1. - С.39-47. (Изв.высш. учебн. заведений).
3. Демьяненко П.А., Зиньковский Ю.Ф., Прокофьев М.И. Обработка сигналов в измерителях с импульсными волоконно-оптическими датчиками. // Радиоэлектроника. Изв. высш. учебн. заведений. 1997. Т.40, №1. С.39-47.
4. Тимошенко С.П., Гудьер Дж. Теория упругости Пер.с англ. М.:Наука, 1979, 560с.

Ключові слова: волоконно-оптичні датчики, оптоелектроніка,	
Дубиковский А.О., Демьяненко П.А.	Dubikovsky A.O., Demjanenko P.A.
<b>Количественная оценка метрологических возможностей прецизионного цифрового акселерометра с волоконно-оптическим датчиком</b>	<b>Numerical estimation of metrological possibilities of the precision digital accelerometer with the fiber-optical sensor</b>
Дана оценка метрологических возможностей прецизионного акселерометра с волоконно-оптическим датчиком.	The estimation of metrological possibilities of the precision digital accelerometer with the fiber-optical sensor unit is given below.

УДК 621.38/621.391.3

## МОДЕЛЮВАННЯ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛІЗАТОРА СИГНАЛІВ В ПРОГРАМНОМУ СЕРЕДОВИЩІ LABVIEW

*Мрачковський О.Д., Вишневий С.В.*

*Розглянуто використання програмного пакету Labview для моделювання спектрального аналізатора на основі алгоритму швидкого перетворення Фур'є.*

Для вирішення задач аналізу радіотехнічних сигналів серед інших застосовуються спектроаналізатори (СА), що використовують алгоритми швидкого перетворення Фур'є (ШПФ) для обчислення амплітудного спектру, спектру потужності, комплексного спектру, ін. Відомі моделі таких приладів [1-3]: SA-7270A, SA-9270A (LG, Корея); GSP-810, (GoodWill, Тайвань); FS300, FSP7, (Rohde & Schwarz, Німеччина); HP8562E, HP8563A, (Hewlett Packard, США) орієнтовані на задоволення потреб широкого кола споживачів. Однак, для вирішення певних спеціальних задач існує необхідність створення вузькоспеціалізованих вимірювальних комплексів. В таких випадках доречно скористуватися технологією програмного середовища *Labview*, яке дозволяє вирішити вказану задачу створенням відповідного спеціалізованого приладу на базі персонального комп'ютера (ПК) [4].

Як приклад, розглянемо моделювання СА, що вимірює спектр потуж-